

Вестник ТвГУ. Серия "География и Геоэкология". 2018. № 3. С. 15-39.

УДК 551.515.6

DOI: <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-15-39>

ОБЗОР РАБОТ, ПОСВЯЩЕННЫХ МОДЕЛИРОВАНИЮ ЯВЛЕНИЙ ОБТЕКАНИЯ НЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ И КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ВЕТРОВ ТИПА БОРЫ

**М.К. Беданок¹, Р.Б. Берзегова¹, В.Н. Кожевников²,
Я. А. Экба³, О.П. Шевякова¹**

¹Майкопский государственный технологический университет, Майкоп,

²МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва,

³Институт экологии Академии наук Абхазии, Республика Абхазия, Сухум

В работе рассматриваются двумерные задачи обтекания неровностей поверхности земли следующих видов: нелинейные и линеаризованные, многослойные и однослойные, ограниченные и неограниченные. Обсуждаются три основных механизма возникновения боры, в рамках которых рассматриваются исследования боры: а) на основе аналитических нелинейных моделей, б) на основе применения различных численных моделей.

Ключевые слова: физика атмосферы, гидродинамика, обтекание, орографические возмущения, орографические волны, подветренный склон, масштаб Лира, гидравлический скачок, обрушение волн, бора, Новороссийская бора, модель WRF-ARV.

В настоящее время становится все более актуальным необходимым знание особенностей влияния горных систем на атмосферные потоки, т.к. значительная часть мезомасштабных (местных) циркуляций возникает в результате взаимодействия крупномасштабного атмосферного потока с орографическими неоднородностями подстилающей поверхности. Это важно для исследования природы катастрофических ветров типа боры и их прогноза, разработки методов локального прогноза погоды, искусственного воздействия на погоду и климат, определения степени опасности полетов авиации в горных районах.

Исследования орографических возмущений, возникающих в атмосфере при обтекании гор, ведутся давно. Наиболее успешно это делается на основе гидротермодинамического моделирования. Решения данной проблемы начались с создания самых простых моделей, в которых:

1) использовалось предположение о малости адвективных слагаемых уравнений движения; в дальнейшем такие модели стали называть линейными;

2) предполагалось, что на достаточном расстоянии перед горами движущаяся атмосфера невозмущена, т.е. имеет характер равномерного стационарного потока, характеристики которого известны и зависят лишь от высоты; впоследствии это состояние атмосферы стали называть натекающим потоком и исходным состоянием задачи;

3) рассматривалось среднемасштабное приближение и на этом основании действие сил Кориолиса не учитывалось;

4) изначально рассматривались только двумерные горы, поэтому орографические возмущения считались двумерными и изучались только в вертикальной плоскости, направленной по направлению натекающего потока, что дало этим моделям название двумерных;

5) использовалось стационарное приближение, которое позволяет исследовать только установившиеся возмущения (не зависящие от времени).

Наиболее полное представление о переваливании воздушного потока через достаточно длинный хребет цилиндрической формы дают стационарные двумерные задачи. Решение строится в плоскости, перпендикулярной к образующей хребта, а от координаты, направленной вдоль образующих, ничего не зависит. Большинство авторов исходят из адиабатичности движений, пренебрегают вязкостью, теплопроводностью и влажностью воздуха. За основное состояние принимается состояние натекающего потока, который вдали перед неровностью земли движется над плоской землей, стационарен и невозмущен. Здесь он горизонтален и все его параметры зависят лишь от одной вертикальной координаты. Вдоль вертикали выполняется условие гидростатического равновесия, так что распределение плотности, давления и температуры в основном состоянии определяется заданием какой-либо одной величины – остальные находят за счет использования дополнительно к условию равновесия уравнения состояния. Зачастую задаются ходом температуры, реже – плотности. Также натекающий поток характеризуется величиной скорости. Свойства натекающего потока во всех работах практически учитываются одинаково через параметр:

$$k^2 = \frac{1}{\bar{u}^2} \left[g \frac{\gamma_a - \gamma}{\bar{T}_1} \right], \quad (1)$$

где \bar{u} - скорость натекающего потока, g - ускорение силы тяжести, γ_a и γ - сухадиабатический и обычный градиенты температуры, \bar{T}_1 - среднее

значение температуры в тропосфере. Сомножитель в квадратных скобках называется частотой Брента-Вяйсяля и определяет частоту собственных колебаний ν_c частицы воздуха при смещении ее с исходного уровня. Величина k определяет длину волны траектории этой частицы [61,62,67]:

$$\lambda_c = \frac{2\pi}{k} = 2\pi \frac{\bar{u}}{\nu_c}, \quad (2)$$

которую называют собственной длиной волны натекающего потока или масштабом Лира. В [62] было показано, что длина орографических волн коррелирует с λ_c , а конкретные расчеты траекторий движения выявили, что возмущения при увеличении высоты изменяются почти периодически и практически с тем же периодом λ_c . Было продемонстрировано, что возмущения зависят от формы гор, а вертикальные смещения достаточно существенны.

Задачи по данной проблеме принято делить на линейные и нелинейные, причем первых подавляющее число. Решение в линейных моделях ищется с использованием гипотезы о малости адвективных слагаемых уравнений движения [4, 6, 25, 33, 37, 38, 45, 67, 71, 76]. В нелинейных моделях с помощью некоторого преобразования, справедливого для частного случая, исходные уравнения преобразуются к одному линейному уравнению без использования каких либо предположений о малости возмущений. В последнее время многие ученые стали отказываться от линейных моделей, т.к. в результате расчетов проявляется некорректность, состоящая в том, что получаемые здесь возмущения оказываются не малыми. Это привело к необходимости создания нелинейных моделей.

Первая нелинейная модель была создана Лонгом [61]. Он показал, что основные свойства возмущений можно представить на плоскости изменения параметров (h, F) , где h - безразмерная максимальная высота горы в долях толщины канала H . Здесь показано, что свойства возмущений в первую очередь зависят от того какой из вариантов имеет место:

$$F > \frac{1}{\pi} \quad \text{или} \quad F < \frac{1}{\pi}, \quad (3)$$

или при использовании масштаба Лира

$$\frac{\lambda_c}{2} < H \quad \text{или} \quad \frac{\lambda_c}{2} > H. \quad (4)$$

В области $F < \frac{1}{\pi}$ начинает проявлять себя настоящий резонанс возмущений, а не резонанс в смысле «отклика». В указанной плоскости параметров задачи по мере уменьшения числа Фруда по оси $h=0$ расположены особые точки, в которых

$$F = \frac{1}{n\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

На любом отрезке значений $\frac{1}{(n+1)\pi} < F < \frac{1}{n\pi}$ возмущения от параметров h , F зависят качественно одинаково. При малых значениях $h > 0$ возмущения имеют вид не очень развитых волн, но по мере увеличения этой высоты их амплитуда быстро возрастает и при некотором значении h_m возмущения становятся роторными, точнее по определению Лонга в зоне возмущений появляются точки, в которых частицы воздуха перемещаются вертикально. Величина h_m зависит от F ; эта зависимость плавная и имеет один максимум на рассматриваемом отрезке. Индекс r здесь вводится для того, чтобы напомнить, что речь идет о появлении ротора, а индекс n - для того, чтобы показать зависимость этой функции от номера рассматриваемого диапазона. Во всех точках функции $h_m(F)$ число Ричардсона принимает нулевое значение:

$$R_i = -\frac{\partial \rho}{\rho \partial z} / \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 = 0. \quad (6)$$

Точки со значениями $R_i = 1$ при любых F соответствуют значениям высот, которые чуть меньше значений h_m . Это позволяет утверждать, что на любом рассматриваемом отрезке увеличение величины h сопровождается постепенным увеличением амплитуд волн и при этом в начале возмущения ламинарны, затем становятся турбулентными. Лонг утверждает, что при условии (6) скорее всего режим становится турбулентным. Однако его лабораторные эксперименты показывают, что роторное течение может оставаться ламинарным. Это доказывает, что в расслоенной жидкости устойчивость возмущений выше, чем в однородной. Далее Лонг показывает, что значения функции $h_m(F)$ при приближении ситуации к условиям (5) плавно стремятся к нулю. Кроме того он показывает, что одновременно с этим $R_i \rightarrow -\infty$. Это означает, что при выполнении условий (5) решение имеет особенность, т.е. в практическом плане не существует. Полезно

этот результат выразить так: при выполнении условия (5) даже бесконечно невысокая гора приводит к турбулизации возмущений. Для полного разъяснения этой ситуации преобразуем условие (5) к виду:

$$H = \frac{n\lambda_c}{2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

Ясно, что в точках F , удовлетворяющих условиям (5, 7), имеет место резонанс – внутренняя энергия волн полностью отражается от верхней жесткой границы потока жидкости.

Важно отметить, что внутри рассматриваемого диапазона значений чисел Фруда величина h_m уменьшается при удалении от координаты максимума F_n как в направлении уменьшения значений чисел Фруда, так и увеличения. Значит, интенсивность возмущений может возрастать как при уменьшении скорости U , так и при ее увеличении (аналогичную зависимость можно увидеть и для величины $\frac{1}{N}$). Это совершенно новый результат.

При переходе от одного рассматриваемого диапазона значений F к следующему диапазону, с большим значением числа n , значения величин h_m резко уменьшаются (такой переход означает переход к новому диапазону значений U , или N). Особенно важно, что изменения диапазона величин $h_{r(n+1)}$ при таком переходе существенно больше, чем вариации параметров h_m . Получается, что при переходе к диапазонам с большими значениями числа n интенсивность возмущений особенно резко возрастает.

Работа [61] дала ясно понять, что принципиальное значение имеет вопрос о том, как в модели учитывается вертикальная неограниченность атмосферы. В связи с этим возникла необходимость разделять модели на закрытые и открытые. В первых рассматривается движение атмосферы в канале с горизонтальной жесткой границей. Как было показано в [61], в таких моделях необходимо учитывать резонансные эффекты, связанные с возможностью существенного отражения волновой энергии возмущений от верхней границы. В открытых моделях учитывается вертикальная неограниченность атмосферы, тем самым допускается возможность ухода энергии по высоте на бесконечность.

Полученные Лонгом результаты теоретически и экспериментально качественно подтверждены исследованиями Дэвиса [39]. При этом были рассмотрены неровности конкретной формы – в виде бесконечно тонкой стенки и в виде треугольника. Кроме того, установлено, что возмущения могут серьезно зависеть от формы неровности. Еще важнее, что экспериментально было установлено, при

каких условиях ламинарный характер возмущений становится невозможным и переходит в турбулентный. Выяснилось, что в случае стенки, модель теряет адекватность уже в диапазоне со значением $n = 2$, а в случае треугольной горы – со значением $n = 3$.

Важно отметить вывод о необходимости учитывать реальные характеристики обтекаемой неровности и в первую очередь ее высоту. Именно поэтому линеаризованные модели стали считать не корректными и начали искать решения проблемы без использования предположения о малости возмущений. Такие модели как говорилось выше получили название нелинейных.

В результате многочисленных экспериментальных наблюдений установлено, что атмосфера имеет расслоенную структуру и термодинамические параметры атмосферы заметно меняются с высотой. Потому учет стратификации атмосферы в рассматриваемых задачах дает возможность точнее и глубже понять реальную природу данного явления. Наиболее полно эта проблема рассматривалась для линеаризованных моделей [6, 25]. Однако в силу некорректности линейных задач, намного важнее рассмотреть проблему учета неоднородности атмосферы по вертикали в рамках нелинейных моделей.

Нелинейная трехслойная модель для изучения обтекания гор была применена в работе [72] одной из первых. У авторов была цель изучить взаимодействие течения с приземным ротором, но не изучение влияния расслоения. В работе нет четко сформулированных условий, при которых возникает такая структура течения. Данное исследование мало прояснило рассматриваемую проблему. В работе [56] исследуется обтекание стабильно стратифицированной несжимаемой жидкостью горных хребтов различной формы и высоты для случая, когда горизонтальный масштаб больше вертикальной длины волны. Рассматривается решение уравнения Лонга для двумерного течения стратифицированной жидкости [61]. Одним из препятствий для более широкого применения анализа Лонга авторы считают трудность получения решений, которые соответствовали бы правильным нелинейным нижним граничным условиям. Выходом из этой ситуации представляется формирование линейного решения, которое бы им соответствовало. Для верхней границы задано условие излучения, которое допускает только восходящее распространение энергии волн. Это условие применяется к нелинейным волнам с некоторой неопределенностью, поскольку может происходить частичное отражение за счет взаимодействия и выхода вверх распространяющихся волн. В работе применяется условие излучения с использованием обобщения метода, предложенного для линейных волн [42].

Рассматриваются три профиля рельефа: синусоидальный, колоколообразный и асимметричный. Используются нелинейные нижние и верхние (излучающие) граничные условия, они оказываются

сильно влияющими на структуру волн при больших амплитудах. Анализ результатов для симметричных и асимметричных профилей горных хребтов показывают, что амплитуда волны и волновое сопротивление значительно увеличиваются для гор с пологими наветренными частями и крутыми склонами подветренной стороны. Качественный характер течения, и особенно его асимметрии, зависит главным образом от удовлетворения нелинейного нижнего граничного условия, а использование условия линеаризованного излучения позволяет определить решения, сохраняющие правильные качественные свойства.

Нелинейная аналитическая трехслойная модель сформулирована в работе [68], а в последующем частично повторенная в [18, 19]. Моделирование процесса обтекания гор осуществлялось на основе решения уравнения Гельмгольца для возмущений функции тока [16, 18 – 20]:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \psi' + K^2 \psi' &= 0, \quad \psi' = \psi - \psi_0, \quad \psi_0 = -Uz, \quad K = \frac{N}{U} = 2\pi\lambda_c^{-1}, \\ N^2 &= \frac{g}{\Theta} \frac{d\bar{\Theta}}{dz} = \frac{g(\gamma_a - \gamma)}{T_1}, \quad \gamma = -\frac{d\bar{T}}{dz}, \quad \lambda_c = 2\pi \frac{U}{N}, \quad \Theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \\ \nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \end{aligned}$$

где ψ - функция тока, ψ' - ее возмущения, ψ_0 - ее значения в невозмущенном натекающем потоке перед горами, где заданы скорость U и градиент γ . Кроме того, здесь: x, z - горизонтальная и вертикальная координаты в рассматриваемой вертикальной плоскости, N - частота Брента-Вяйсяля в натекающем потоке перед горами, λ_c - волновой масштаб Лира [62] (в зарубежных публикациях его называют параметром Скорера, хотя у последнего он введен был позже, в иной форме и без анализа физического смысла), Θ - потенциальная температура, γ_a - сухоадиабатический градиент температуры, T - температура, T_1 - характерная (средняя) температура слоя, g - ускорение силы тяжести, k - отношение удельных теплоемкостей. Величины, характеризующие значения параметров в натекающем потоке, выделяются чертой сверху.

Модель позволяет в значительной части пространства над горами правильно оценивать фазы и амплитуды волновых возмущений. Проведенные расчеты позволили получить данные о влиянии устойчивого слоя над горами на силу приземного ветра. Было показано, что наличие такого слоя может в определенных случаях уменьшать ветер вдоль подветренных склонов горы. Расчеты также свидетельствуют, что высокоустойчивый слой над тропопаузой при малых значениях

характерного волнового масштаба λ_c может не учитываться при моделировании, тогда как при больших значениях λ_c его учитывать вероятнее необходимо – особенно когда изучаются возмущения в стратосфере. По данной модели было проведено исследование орографических возмущений и степень опасности полетов авиации в горах Республики Адыгея [34]. Были рассчитаны показатели безопасности полетов над горами Республики Адыгея для двух типов самолетов (легкомоторных и скоростных). Определено расположение в пространстве над горами областей повышенной опасности и как они зависят от свойств натекающего потока. Показано, что в определенных частях пространства эта опасность может быть критической.

В последние годы многослойные модели используют численное решение исходных уравнений задачи. Большой интерес вызывают работы [43, 44]. В частности, нужно отметить следующее: 1) подчеркивается, что усиление приземных скоростей может происходить и без наличия инверсионного слоя в средней тропосфере над поверхностью горы, однако при этом линии тока в этой части течения достаточно сильно прижимаются к земле из-за появления выше них роторных областей; 2) делается вывод, что сильные приземные скорости в большей степени определяются тем, что в многослойной модели учитывается наличие высокоустойчивой стратосферы; 3) изучена возможность проявления резонансных эффектов в трехслойной модели, когда значения масштаба λ_c в нижнем слое соответствуют условию резонансного отражения энергии от нижней поверхности раздела. Однако, как признают и сами авторы, интерпретация результатов применяемого метода численного моделирования не всегда остается ясной.

В работах [57, 58, 70, 79] обсуждаются режимы двумерного потока для непрерывно стратифицированного течения над двумерной горой с помощью нелинейных численных моделей, а также механизмы генерации сильных ветров у подветренного склона и обрушения волн. Авторы находят состояние течения на двух стадиях движения процесса к стационару. Однако даже в гидростатическом варианте стационар не достигнут. Изменение картины во времени имеет непосредственное отношение к технике расчетов, и сомнительно, что его можно прямо соотносить к развитию природного процесса во времени. Напряжение Рейнольдса определяется с большими ошибками. Также можно увидеть, что в трех случаях, т.е. при числе Фруда $F < 1.3$, появляются замкнутые роторы. Блокировки натекающего потока нет, есть появление области турбулентности в приземном и над приземным слоем. Авторы утверждают, что область разрыва волнового поля в атмосфере действует как внутренняя граница, которая отражает вертикальный поток волновой энергии назад к земле и создает состояние с высоким сопротивлением за

счет частичного резонанса. Однако отражение может определяться только специальными исследованиями, а без этого это очень приблизительные и качественные рассуждения. Остается непонятным тот факт, что при анализе результатов нелинейной теории используется понятие критического уровня, полученного из линейной теории.

Одной из основных климатических характеристик районов, в которых присутствуют горные склоны являются подветренные бури. Термин «подветренные бури» (или ветры подветренных склонов) – дословный перевод с английского «downslope windstorms» [43]. Эти ветра возникают на подветренных склонах при переваливании воздушными потоками горных препятствий. В одних случаях они приносят повышение температуры (фены), в других – похолодание (ветра типа боры).

Бора (греч. Βόreas – северный ветер) – название сильного холодного и порывистого ветра, дующего с низких горных хребтов в сторону теплого моря. Классическая бора связана с переваливанием холодной воздушной массы через горный хребет, когда с наветренной стороны происходят подъем воздуха, конденсация водяного пара, образование облачности, а с подветренной стороны интенсивный нисходящий поток воздуха, достигающий ураганной силы [3, 26, 29]. Считается, что вертикальный масштаб боры достигает 200–400 м, а горизонтальный – всего несколько километров от берега [3]. Наблюдается бора в холодное полугодие, в период с октября по апрель.

Природа подветренных бурь изучена достаточно подробно, но единого мнения о главенстве того или иного фактора при ее формировании не достигнуто. При этом главным признаком, по которому проводится разделение орографических ветров на типы является механизм формирования. На сегодняшний день исследование механизма возникновения боры сводится к сравнению данных наблюдений либо с волновой теорией (то есть моделирование подветренных волн с помощью линейной и нелинейной теорий с использованием профилей скорости и устойчивости, полученных из данных зондирования или других данных) [20, 56, 67], либо с теорией обрушения волн (то есть моделирование с помощью нелинейных уравнений, с учетом различных нелинейных эффектов и трехмерной структуры боры – струи, области застоя воздуха, роторы и др.) [14, 58, 66], либо с теорией гидравлического скачка [54, 60, 78]. Также не исключается взаимодействие всех трех механизмов, поскольку считается, что сильные подветренные бури, связанные с волновым обрушением, схожи с реакцией гидравлического подветренного потока, усиленного слоем тонкой инверсии.

Выше был дан обзор работ, посвященных волновому подходу при исследовании подветренных бурь в рамках нелинейной теории. Отметим, что основным нелинейным эффектом, способствующим усилению ветра на

подветренном склоне, является обрушение внутренних гравитационных волн, которые возбуждаются внутри непрерывно стратифицированной среды. Причинами могут быть уменьшение плотности воздуха с высотой или на критических уровнях. Последнее для орографических волн соответствует высоте, на которой компонента скорости потока, перпендикулярная хребту, равна нулю [20, 63].

Теория гидравлического скачка основана на решении задачи обтекания с помощью уравнений мелкой воды. Увеличение скорости ветра в подветренной части склона объясняется переходом натекающего потока из субкритического (медленный и глубокий поток) к свехкритическому (быстрый и мелкий поток) состоянию с образованием аналога гидравлического скачка в атмосфере за подветренным склоном [60]. Наиболее серьезным допущением является несжимаемость потока, когда динамический эффект температурной стратификации атмосферы учитывается посредством введения искусственного скачка плотности на свободной поверхности раздела, отделяющей нижний слой от вышележащей неограниченной по высоте области невозмущенного потока. Многочисленные исследования [43, 44, 78] подтвердили правомочность использования гидравлического подхода для объяснения условий возникновения подветренных бурь, а также при анализе структуры потока за подветренным склоном.

Первые теоретические попытки исследования боры были сделаны на Адриатике [64]. При этом в аналитических моделях бору рассматривали как кататический ветер, т.е. гравитационных течений холодного приповерхностного воздуха, стекающего с прибрежных гор в теплую атмосферу над морем [52, 80]. В результате данных исследований пришли к выводу, что усиление ветра при этом процессе достаточно мало и не соответствует наблюдаемому [47]. Дальнейшие теоретические исследования боры связаны с применением упрощенных моделей динамического взаимодействия натекающего потока с неровностями земли [20, 36, 46, 51, 54, 74].

Как известно, подветренные возмущения непосредственно связаны с крупномасштабной структурой метеорологических полей. Пользуясь этим создаются синоптические модели подветренных бурь, учитывающие скорость и направление ветра в нижней или средней тропосфере, сдвиг ветра с высотой, вертикальный градиент температуры и т.д. [12, 59]. Подобные модели носят практический интерес именно для прогноза боры.

В последнее время для исследования и прогноза подветренных бурь широко используется численное мезомасштабное моделирование. Подобные модели могут использоваться в режиме идеализированного и реального моделирования. Подавляющее число идеализированных моделей используют системы двумерных несжимаемых нелинейных уравнений гидротермодинамики. При этом рельеф задается в идеализированном виде, а граничными условиями служат данные

наветренного радиозондирования [41, 43, 69]. Среди идеализированных моделей можно встретить модели, в которых натекающий поток задается искусственно, где частота Брента-Вяйсяля и скорость натекающего потока задаются постоянными по высоте [76, 77].

Спомощью модели ECMWF в [55] проводилось численное моделирование адриатической боры при переменной высоте и форме рельефа. Показано, что возникновение ветра типа боры происходит только в случаях с реальным рельефом, причем на достаточно низких высотах хребта усиления ветра с подветренной стороны не фиксировалось, а для больших высот – натекающий поток полностью блокировался с наветренной стороны.

В работе [46] применялась полная гидродинамическая модель атмосферы с определенными упрощениями для рассмотрения влияния различных факторов на динамику ветров при адриатической боре. Используется мезомасштабная модель RAMS при отсутствии трения на нижней границе. При наличии трения с подветренной стороны хребта возникает разрыв пограничного слоя, а у земли заметен слабый ветер. При отсутствии трения возникает обрушение внутренних гравитационных волн и струя достаточно сильного ветра опускается по подветренному склону к поверхности земли, что указывает на сильное влияние трения на поведение потока в подветренной части.

Большое количество работ посвящено также моделированию реальных эпизодов боры. Например, в работе [36] проводилось исследование порывистости адриатической боры с использованием модели COAMPS с разрешением 300 м. Было показано, что порывы у земли наблюдались при наличии низкоуровневого обрушения волн, а также скачка. При этом отсутствие порывов сопровождалось наличием подветренных волн и ротора, а обрушение отмечалось лишь в районе тропопаузы. Другая модель MEOM06 была использована тоже для исследования порывистости адриатической боры [35]. Однако модель достаточно грубо учитывает максимальные скорости ветра, но хорошо воспроизводит общий временной ход скорости ветра при боре.

Для моделирования боры в Корее была использована модель WRF [50], которая позволила сделать выводы о физическом механизме возникновения явления. Авторы полагают, что основным условием формирования боры является существование критического уровня на высотах 8-9 км, от которого происходит отражение волн и возникает резонанс.

Следует упомянуть такие крупные проекты по исследованию боры как ALPEX [40, 46], MAP [32, 48], T-REX [32, 49], в рамках которых проходят комплексные синхронные наблюдения отдельных эпизодов подветренных бурь. В основном, сделанные в ходе работы выводы о структуре потока, согласуются с результатами моделирования.

Недостатком этих проектов является небольшая длительность и малый пространственный охват измерений.

Помимо боры проводятся исследования и фёна. В работе [46] рассматриваются фёны в Альпах на основе результатов модели COAMPS с разрешением 1 км, которые сравниваются со спутниковыми данными, наземными измерениями, с данными лидарного зондирования. Были проанализированы траектории частиц и блокирование потока. По вертикальному профилю потока импульса, связанного с внутренними гравитационными волнами установлено, что в нижней тропосфере и стратосфере происходит обрушение волн, причем в тропосфере сопровождается гидравлическим скачком.

В России наиболее известна Новороссийская бора, под которой понимают появление катастрофически сильного ветра в городе и в Цемесской бухте, когда с северо-востока, перевалив через горы, в район приходит холодная воздушная масса. Впервые причины возникновения новороссийской боры были исследованы русским географом Ф.Ф.Врангелем [22], другое крупное исследование этого явления — работа [13]. В ней на основании десятилетних наблюдений на станции Новороссийск изучена изменчивость основных метеорологических характеристик во время боры, повторяемость по месяцам и ее продолжительность. Первое подробное описание новороссийской боры было дано в лоции Черного моря, изданной в 1947 г. Следующим важным шагом на пути исследования боры стала работа А.М. Гусева, до сих пор считающаяся классической [23]. В ней, в частности, показано, что условия образования боры существенным образом зависят, с одной стороны, от соотношения высоты горного хребта и мощностью натекающего слоя воздуха, а с другой от величины температурных контрастов в атмосфере. В работе [7] новороссийская бора исследовалась с помощью аналитической модели, основанной на уравнениях теории «мелкой воды». Авторами было указано на существование докритических и критических решений, а также и на возможность появления скачков давления, с помощью которых можно попытаться объяснить некоторые особенности движения воздуха в горах, и в частности такое явление, как бора. В работах [21, 24] рассматриваются вопросы прогноза боры и его синоптические аспекты.

В работах [8, 9, 27, 28] бора в Новороссийске исследовалась с целью решения проблемы прогнозирования этого опасного явления с помощью численной мезомасштабной негидростатической модели WRF-ARW. Данная модель учитывает много больше физических факторов явления, чем аналитические модели, однако, как обычно, это делается посредством использования методов параметризации.

Работа [27] посвящена исследованию возможности численного моделирования прогноза боры, причем рассматривается конкретный случай боры. Показано, что две главные черты боры численным методом

воспроизводятся: а) орографическая асимметрия возмущений, б) количественные характеристики различий по потоку. Отмечено, что требуются дальнейшие исследования по части параметров модели, в частности в отношении размеров шага дискретизации, параметров параметризации важных физических факторов атмосферных процессов в приземном слое и т.д. Общие закономерности явления не исследуются. Сообщается, что кроме численных подходов к исследованиям проблемы используются модели двух типов – гидравлическая и волновая. Модельное поле скоростей качественно подтверждает, что гребни главных волновых возмущений параллельны горам. Значит, картина возмущений близка к двумерной, причем возмущения максимальны у подножия Маркотхского (подветренного) хребта гор и они позволяют предполагать, что в реальности порывы должны были достигать значений в 30 м/с, т.е. превышать прогнозируемые в 1.5 раза. Прогноз заставляет обратить внимание на изменения процесса во времени и главным образом на то, что дескритизация данных по времени должна быть порядка десятка минут. Авторы, рассматривая возможное использование волновой и стоковой моделей, отдают предпочтение первой из них.

В работе [8, 9] проводится численное моделирование сильной бory 7 – 8 февраля 2012 года. Сравнение данных об изменениях во времени скорости на высоте 10 м и температуры на высоте 2 м проведено по данным измерений и численного расчета в районе Новороссийска. Авторы полагают, что следует различать три стадии изменений явления во времени: начальную, кульминационную и завершающую. Нет пояснений о том, где и как проводились измерения. Численные расчеты проводились не непрерывно, а для дискретных начальных данных. Данные расчетов полей скорости и потенциальной температуры в вертикальной плоскости, направленной по меридиану, проведенные для трех моментов времени в диапазоне высот до 3 км показали следующее: а) поскольку направление меридиана не совпадает с перпендикуляром к горам представленные разрезы говорят о наличии определенной двумерности возмущений; б) возмущения резко меняют свой характер во времени и поэтому их анализировать следует отдельно для разных промежутков по времени (выше даны авторами названия для этих периодов). Показано, что бору следует рассматривать как нестационарный процесс вторжения масс холодного воздуха с севера через горы на юг, вытесняющего массу теплого воздуха. Также показано, что возмущения при боре существенно изменяются по вертикали. Данные расчетов о деталях изменений по вертикали следует считать довольно приближенными, особенно насчет приподнятых струй. Во-первых, нет измерений. Во-вторых, вероятно параметризация разных процессов не идеальна, особенно турбулентности вблизи земли, если вообще она возможна. Ничего не сказано о возможных зависимостях

параметризаций от сезона, месяца, типа воздушной массы и т.д. Показано, что форма неровностей рельефа оказывает на возмущения определяющую роль. При этом изменения по горизонтали имеют явную двумерную составляющую (гребни волн параллельны линии гор) и одновременно в области бухты заметны существенные отклонения от двумерности (влияние полуостровов по ее краям). Вывод о временных стадиях явления является достаточно важным и убедительным. На наш взгляд следовало для кульминационной стадии провести расчеты еще для одного срока, например, для 0 часов 8 февраля. Тогда стало бы понятнее, какие характеристики имеет бора, как квазистационарный процесс перемалывания холодного воздуха через горы.

Исследованию настройки численной модели прогноза Новороссийской боры при использовании результатов измерений возмущений атмосферы – на стандартных станциях метеослужбы, а так же в приземном слое у гор и в подветренной области посвящена работа [28]. Подтверждено, что самое существенное влияние на результаты прогноза оказывает учет в модели свойств приземного слоя и характеристик турбулентности. Прогноз по модели дает удовлетворительные результаты (в рамках принятых стандартов) в отношении характерных величин. Однако потребителей волнует в первую очередь прогноз максимальных значений скорости, а эта сторона проблемы остается пока совершенно не оцененной. Кроме того: а) рассматривается один конкретный случай боры, а именно 26-28 января 2012, б) не исследуются общие закономерности этого явления, – в частности зависимость от замеченных периодических изменений натекающего потока; в) размер разрешения по горизонтали используется недостаточно малый (порядка 2 км), чтобы исследовать зависимость явления от важных факторов боры. Делается вывод, что результат моделирования существенно зависит от параметризации процессов в пограничном слое и турбулентности. Не ясно, что имеется в виду. Результаты измерений и моделирования показывают, что изменения скорости во времени настолько велики, что необходимо переходит к учету изменений скорости с периодом менее 20 минут. Кстати, следует отметить, что не указывается, как меняется в экспериментах натекающий поток со временем и насколько он не стационарен.

В работе [5] проводится анализ того, насколько хорошо можно прогнозировать возмущения атмосферы в конкретный период времени, включающий две боры у северо-восточного побережья Черного моря (январь-февраль 2012 года), в том числе особенно сильную бору 7-8 февраля в районе Новороссийска. В первую очередь использовалась численная модель WRF-ARW. Полученные при этом данные о временных изменениях ветра и температуры сравнивались со стандартными метеорологическими измерениями в 5 прибрежных точках, в том числе в г. Новороссийске. Особое внимание следует

обратить на то, что авторы делают вывод, что результаты моделирования наиболее существенно зависят от того, как осуществляется параметризация процессов конвекции и турбулентности в приземном слое толщиной 1.5 км. Авторы обращают внимание на то, что в период наибольшего развития боры в Новороссийске направление ветра действительно свидетельствует о том, что бора определяется переваливанием масс воздуха поперек горных хребтов и что именно в этот период снижается температура воздуха у земли. Кроме того в работе используется анализ результатов наблюдений из Космоса и в первую очередь радиолокационных наблюдений. Анализ позволяет обратить внимание на три аспекта возмущений. Первый – наличие орографического исчезновения облачности над морем вдоль всего побережья протяженностью порядка 300 км. Второй – интенсификация волнения на поверхности моря явно связана с потоками воздуха, переваливающими через прибрежные горы. Третий – влияние боры над морем продолжается до 400 км удаления от побережья. Все три аспекта свидетельствуют, что речь идет именно о боре. Работа не направлена на вскрытие физических факторов боры, авторы признают что при таких исследованиях следует серьезно уменьшать шаги дискретизации. Измерения, численные расчеты и снимки из Космоса показали, что исследовалась именно бора и что ее масштабы вдоль побережья и по удалению от гор по потоку покрывают область около 300 на 300 км. Результаты расчетов сильнее всего зависят от качества параметризации процессов в нижнем слое атмосферы толщиной около 1.5 км. Полосы на радиолокационных снимках, совпадающие по направлению с направлением основного потока атмосферы неубедительно объясняются образованием ветровых струй. Снимки в оптическом диапазоне показывают, как выглядело поле облачности во время боры. Оно обращает внимание на две его особенности – на безоблачную полосу, параллельную линии берега (и одновременно линии прибрежных горных хребтов), - и на облачные улицы конвективных облаков, ориентированные по направлению основного потока, т.е. поперек линии гор. Картина облачности свидетельствует, что полосы на радиолокационных снимках указывают не на характеристики поля ветра, а на характеристики поля влажности, которые определяются процессами конвекции и образования облаков.

Работа [30] посвящена исследованию аспектов гидродинамики Новороссийской боры. Используются имеющиеся данные измерений характеристик атмосферы в течении пяти периодов времени. Особенно подробно разбираются два периода, один из которых включает сильную бору и другой – слабую. Важно, что эти периоды характеризуют разные стадии изменений возмущений атмосферы – предначальную, кульминационную и заключительную. Используются также данные обширных численных экспериментов. В итоге выявлено много важных

характеристик этого явления и сделан важный вывод о том, что волновая гидродинамическая модель, видимо, более подходит для описания боры, нежели стоковая модель. Данные измерений скорости ветра, несмотря на их недостатки в отношении их разделения по признаку расположения относительно хребтов (наветренные -1, на подветренном склоне -2, у подошвы подветренного склона -3, на удалении от 3 по потоку), свидетельствуют о следующем: а) возмущения имеют квазидвумерный характер, поскольку главные качественные изменения можно описывать в вертикальных сечениях, перпендикулярных к средней линии ориентации гор (практически по направлению фонового потока).; б) возмущения зависят от того, где вертикальное сечение пересекает горы (район Новороссийска или Геленджика, например); в) возмущения сильно зависят от времени. Это означает, что следует каждую конкретную бору характеризовать в тесной связке со временем. Авторы не отмечают признаков двумерности, хотя признают, что во всех рассмотренных вариантах у подножия подветренного хребта скорость ветра выше, чем перед горами и в подветренной части на удалении от них. Как и ранее было сказано, авторы, очевидно, дают предпочтение волновой теории по сравнению со стоковой [43, 56]. Они напоминают высказывания предыдущих исследователей о двух возможных вариантах развития боры при обтекания гор. Первый - когда после переваливания гор поток воздуха резко ускоряется у подветренного склона гор и вдоль земли ниже по потоку. Второй - когда вдоль земли ниже по потоку за горами ветер ослабляется или даже направлен навстречу основному потоку вследствие возникновения здесь локального вихря с горизонтальной осью (ротора), вращение частиц воздуха в котором и обеспечивает указанное направление ветра у земли. Первый вариант авторы объясняют по разному. Во-первых, они ссылаются на исследование подобной ситуации у берегов Адриатического моря, когда переваливший через горы поток встречал острова в море. Во-вторых, они полагают, что подобную островам роль могут сыграть резкие усиления орографических волн над морем ниже по потоку от гор. Последнее предположение результатами работы подтверждается. Вывод авторов о том, что сильная бора прямо связана с сильными ветрами в натекающем потоке, представляется требующим более детального исследования. Также по этой модели отмечалось наличие гидравлического скачка над подветренным склоном, подветренных волн, обрушения гравитационных волн и сильной приземной инверсии температуры на подветренной стороне [5, 9, 31]. В течение одного эпизода боры режим обтекания меняется от докритического к сверхкритическому и наоборот. В работах получены оценки толщины слоя северо-восточных ветров с наветренной и подветренной стороны, высоты низкотропосферного струйного течения на наветренной стороне, высоты максимальных скоростей ветра на подветренной стороне,

горизонтального масштаба явления и т.д., также делаются попытки объяснить преобладание того или иного механизма формирования боры. Аналогичные результаты получены с помощью мезомасштабной модели COSMO [2].

В работе [1] проведено исследование орографических возмущений в районе Новороссийска. Применяется нелинейная, стационарная, двумерная, аналитическая модель [Кож, 1999]. Вертикальная неограниченность атмосферы учитывается путем представления ее в виде трех слоев с разной гидростатической устойчивостью. Свойства невозмущенного натекающего потока учитываются во всем реальном диапазоне его изменений. Изучаются характеристики потока воздуха у подветренного склона обтекаемого рельефа. Высказывается гипотеза о том, что интенсивность боры можно оценивать по величине скорости у подветренного склона гор.

Менее изученной является ялтинская (крымская) бора. Одними из первых работ были [15, 17, 19] в которых проводилось моделирование обтекания Крымского хребта в районе Ялты на основе теории гидротермодинамики. В основу исследований были положены результаты экспедиций. В результате указано на возможность существования в поле возмущений над горами Крыма роторных образований с горизонтальной осью, достаточно стабильных во времени и протяженных в пространстве. Исследование также показало насколько необходимо при моделировании учитывать в должной мере форму рельефа. Отдельные эпизоды крымской боры рассмотрены в работах [8, 11] с помощью мезомасштабной модели WRF-ARW с максимальным разрешением вложенной сетки 0.3 км. Описанный эпизод боры в [8] указывает на то, что натекающий поток находится в докритическом состоянии, над подветренным склоном зафиксировано обрушение гравитационных волн, при этом струя не отрывается от поверхности. В работе [11] описывается иной эпизод боры, когда моделирование показало отрыв пограничного слоя с подветренной стороны Крымских гор и образование интенсивных подветренных волн, причем вертикальный масштаб – вся тропосфера. На основании расчетов числа Фруда было показано, что возникает блокирование нижних слоев потока, а остальная часть потока находится в сверхкритическом состоянии.

Следует упомянуть и новоземельскую бору, изученность, которой намного меньше. В частности, можно указать работу [65], в которой проводится анализ воспроизведения поля ветра в районе Новой Земли по данным реанализа ASR. Новоземельская бора упоминается в работе [53], посвященной статистическому анализу экстремальных скоростей ветра в Арктике. В работе [30] данная бора исследуется с помощью данных наблюдений и реанализа MERRA. Для рассмотренных 12 эпизодов новоземельской боры, выявлено наличие слоя приподнятой инверсии, низкотропосферного струйного течения на высотах, близких к высоте

хребта, обращения ветра с высотой. В моменты максимального развития боры происходит уменьшение частичного блокирования потока горами. Показано, что скорость ветра при боре контролируется в первую очередь мезомасштабным барическим градиентом, который может возникать в результате распространения гравитационных волн над хребтом (волновое сопротивление). Также показано, что новоземельская бора в значительной мере схожа с новороссийской борой, а также с другими ветрами такого типа.

В результате проведенного обзора работ, посвященных проблеме обтекания горных систем и исследованию боры, отметим некоторые моменты. Благодаря работам большого числа исследователей многие конкретные свойства подветренного потока уже выяснены. Бора должна рассматриваться как процесс развития во времени. Причем на первых шагах следует выделять начальную, кульминационную и заключительную стадии ее развития. Форма обтекаемых гор порождает наличие двумерной составляющей в пространственных изменениях возмущений. Во всех случаях боры наибольшего усиления ветра следует ожидать у подветренного склона обтекаемых гор.

Однако мы считаем, что:

1. необходимо продолжить изучение орографических возмущений над горами, когда предположение о верхней границе не используется (неограниченная задача);

2. необходимо детальное исследование влияния размеров гор, их формы на особенности картины обтекания;

3. необходимо дальнейшее уточнение роли устойчивости натекающего потока вообще и изменения ее в отдельных слоях в частности;

4. качество, получаемых результатов с помощью численного мезомасштабного моделирования в указанных выше работах проверяется путем сопоставления их с данными отдельных измерений у земли. Этого явно недостаточно. Для настоящей оценки качества численной модели необходимо проводить оценку надежности применяемых методов параметризации сложных физических процессов именно для изучаемого явления. Для получения такой оценки следует проводить сопоставление результатов расчета с измерениями в достаточно многих точках у земли, а еще важнее – с измерениями на многих уровнях. Наши предыдущие исследования [17] показали, что при использовании в модели послойного учета изменений градиента температуры приходится пока рассматривать слои с заметной вертикальной толщиной. Учет такого слоя в средней части тропосферы, показал, что его влияние на возмущения не так заметно, и важнее применять такие построения для учета влияния эффектов отражения волновой энергии на тропопаузе. Такой подход применяется в наших работах. Обширный опыт наших модельных расчетов с использованием данных радиозондирования показал

следующее: а) радиозондирование обычно проводится не там и не в нужное время; б) получаемые при этом данные характеризуют положение на редком числе уровней высоты, что приводит к недопустимо большой потере точности определения вертикального градиента температуры. Поэтому в наших модельных исследованиях мы пришли к выводу, использовать послойное задание свойств натекающего потока, но в широком диапазоне их изменений. Положение могла бы исправить хорошая статистика, но тогда потребовалось бы проводить запуск радиозондов намного чаще.

В проводимых нами исследованиях применяется аналитическая нелинейная, двумерная, стационарная, открытая модель, рассматривающая явление в рамках среднего масштаба [20], когда силы Кориолиса не учитываются и протяженность обтекаемых гор не превышает 40 км. В модели также приняты во внимание результаты [16], которые показали, что необходимо учитывать реальную форму гор и их большую горизонтальную протяженность. Вертикальная неограниченность атмосферы в модели, как и в [18, 19] учитывается по-новому, а именно путем представления ее в виде трех слоев.

Список литературы

1. Беданов М.К., Берзегова Р.Б., Кожевников В.Н. Численное моделирование новороссийской бора //Геопойск-2017: Материалы II Всероссийского конгресса молодых ученых-географов, Тверь, 23-27 октября 2017 г. / Тверской государственный университет. – Тверь: Изд-во ТвГУ, 2017. – С. 322–332.
2. Блинов Д. В., Перов В.Л., Песков Б.Е., Ривин Г.С. Экстремальная бора 7-8 февраля 2012 г. в районе г. Новороссийск и ее прогноз по модели COSMO-Ru // Вестник Московского университета. Сер. 5, География, 2013, № 4. С. 36–43.
3. Бурман Э.А. Местные ветры/ Л.: Гидрометеиздат, 1969. –341 с.
4. Габов С.А., Свешников А.Г. Задачи динамики стратифицированных жидкостей. М.: Изд-во «Наука», 1986.
5. Гавриков А.В., Иванов А.Ю. Аномально сильная бора на Черном море: наблюдение из космоса и численное моделирование. // Изв. РАН, ФАО. 2015. т.51. № 3. С. 1–12.
6. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Изд. Мир, 1978.
7. Гутман Л.Н., Франкль Ф.И. Гидродинамическая модель бора // ДАН СССР, 1960, Т. 30, № 5.
8. Ефимов В. В., Барабанов В. С. Моделирование черноморской бора //Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2013, Т.49, №. 6. – С. 688–698.
9. Ефимов В.В., Барабанов В.С. Моделирование Новороссийской бора. //Метеорология и гидрология. 2013. т.38. № 3. – С. 171–176.

10. Ефимов В. В., Барабанов В. С. Порывистость новороссийской боры // Метеорология и гидрология, 2013, № 12. С. 68–75.
11. Ефимов В.В., Комаровская О.И. Пространственно-временная структура ялтинской боры // Морской гидрофизический журнал, 2015, № 3. С.3–14.
12. Зимич П. И. Певекский южак / под ред. А.А.Дмитриева, Л.: Гидрометеиздат, 1991. –120 с.
13. Коростолев Н.А. Новороссийская бора // Записки Импер. Акад. Наук, 1904, Т. 15, № 2.
14. Кожевников В.Н. Орографические возмущения в двумерной стационарной задаче. // Изв. АН СССР. 1968. т.4. №.1. С. 33–52.
15. Кожевников В.Н., Козодеров В.В. Теоретическая картина обтекания Крымского хребта в районе Ялты // Изв. АН СССР, ФАО, 1970, т.6, № 10.
16. Кожевников В.Н., Лосев А.С. О построении модели обтекания при точном выполнении граничного условия на цилиндрическом профиле // Вест. МГУ. Сер. 3. Физика Астрономия. 1985. Т. 23. №. 5. С. 43–50.
17. Кожевников В.Н., Бибикина Т.Н., Журба Е.В. Орографические волны, облака и ротаторы с горизонтальной осью над горами Крыма // Изв. АН СССР, ФАО, 1986, т.22, № 7.
18. Кожевников В.Н., Беданов М.К. Нелинейная многослойная модель обтекания произвольного профиля // Изв. РАН, ФАО. 1993. Т. 29. № 6. С. 780–792.
19. Кожевников В.Н., Беданов М.К. Волновые возмущения над горами Крыма. Теория и наблюдения // Изв. РАН, ФАО, 1998, № 4.
20. Кожевников В.Н. Возмущения атмосферы при обтекании гор. М. Научный мир, 1999. 160 с.
21. Мастерских М.А., Бельская Н.Н., Минеева М.Н. Прогноз фронтальной боры в Новороссийске и других сходных физико-географических районах (методические указания) / М.Гидрометиздат, 1973, 20 с.
22. Новороссийская бора и ее теория / [Соч.] Кап.-лейт. бар. Ф. Врангеля. - Николаев: Тип. Ю. Г. Рено, 1876. - [2], 17 с.
23. Новороссийская бора. Под ред. А. М. Гусева / Труды МГИ АН СССР, 1959, Т. 14. – 355 с.
24. Семенов Е.К., Соколихина Н.Н., Соколихина Е.В. Синоптические условия формирования и развития новороссийской боры // Метеорология и гидрология, 2013, № 10, с. 16–28.
25. Скорер Р.С. Аэродинамика окружающей среды. М., Мир, 1980, 549 с.
26. Стехновский Д.И., Зубков А.Е., Петровский Ю.С. Навигационная метеорология. М.: Транспорт, 1971. – 278 с.
27. Торопов П.А., Мысленков С.А., Самсонов Т.Е. Численное моделирование Новороссийской боры и связанного с ней ветрового

- волнения. //Вестник Московского университета. 2013. Серия 5: География. № 2. С. 38–46.
28. Торопов П.А., Шестакова А.А. Тестирование мезомасштабной модели (WRF) для задачи прогноза Новороссийской боры. Вестн. Моск. Ун-та, Серия 3, География. 2014, № 3.
29. Шелковников М.С. Мезометеорологические процессы в горных районах и их влияние на полеты воздушных судов. Л.: Гидрометеиздат, 1985.
30. Шестакова А.А., Моисеенко К.Б., Торопов П.А. Гидродинамические аспекты эпизодов Новороссийской боры 2012-2013 гг. // Изв. РАН, ФАО. 2015. т.51. № 4. С. 1–13.
31. Шокуров М. В. Численное моделирование катастрофических погодных явлений в Черноморском регионе //Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу, 2012. С.301–320.
32. Armi L., Mayr G. J. The descending stratified flow and internal hydraulic jump in the lee of the Sierras //Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2011, Vol. 50, №. 10, pp. 1995–2011.
33. Atkinson B.W. Meso-scale atmospheric circulations. - London-New York-Toronto- Sydney- San Francisco: Acad.Press,1981, 482p.
34. Bedanokov M.K., Berzegova R.B., Kuizheva S.K. Atmospheric Disturbances in the Airflow around Mountains and the Problem of Flight Safety in the Mountains of the Republic of Adygeya // Ecologica Montenegrina. 2017. T. 14. p. 136–142.
35. Belušić D., Klaić Z. B. Estimation of bora wind gusts using a limited area model //TellusA, 2004, Vol. 56, №. 4, pp. 296–307.
36. Belušić D., Žagar M., Grisogono B. Numerical simulation of pulsations in the bora wind //Q. J. R. Meteorol. Soc., 2007, Vol. 133, №. 627, pp. 1371–1388.
37. Berkshire F.H. Two-dimensional linear lee wave modes for models including a stratosphere. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1975, v. 101, p.p. 259–266.
38. Crook N.A. Trapping of low-level internal gravity waves. J. Atmos. Sci., 1988, v.45, № 10, p.p. 1533–1541.
39. Davis R.E. The two-dimensional flow of a stratified fluid over an obstacle. J. FluidMech., v. 36, № 1, 1959.
40. Davies H.C., Pichler H. Mountain meteorology and ALPEX// Meteor. Atmos. Phys., 1990, Vol. 43, pp. 3–4.
41. Doyle J. D., Reynolds C. A. Implications of regime transitions for mountain-wave-breaking predictability //Mon. Wea. Rev., 2008, Vol. 136, №. 12, pp. 5211–5223.
42. Drazin P.G. and C.H.Su A note on long-wave theory of airflow over a mountain. J. Atmos. Sci., 1975, v. 32, p. p. 437–439.

43. Durran D.R. Another look at downslope windstorms. Part I: The development of analogs to supercritical flow in an infinitely deep, continuously stratified fluid. *J. Atmos. Sci.*, 1986, v. 43, p. p. 2527–2543.
44. Durran D.R. and Klemp J.B. Another look at downslope windstorms. Part I: Nonlinear amplification beneath wave-overtaking layers. *J. Atmos. Sci.*, 1987, v. 44, p. p. 3402–3412.
45. Eliassen A., Palm E. On the transfer of energy in stationary mountain waves // *Geofysiske Publikasjoner*, 1961, Vol. 22, pp. 1–23.
46. Gohm A. and Mayor G. J. Numerical and observational case-study of a deep Adriatic bora// *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2005, Vol. 131, pp. 1363–1392.
47. Grisogono B. and Belusic D. A review of recent advances in understanding the meso- and microscale properties of the severe Bora winds// *Tellus*, 2009, Vol. 61A, No. 1, pp. 1–16.
48. Grubisic V. Bora-driven potential vorticity banners over the Adriatic// *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2004, Vol. 130, pp. 2571–2603.
49. Grubišić V., Doyle J.D., Kuettner J. et al. The terrain-induced rotor experiment: a field campaign overview including observational highlights// *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 2008, Vol. 89, pp. 1513–1533.
50. Jang W., Chun H. Y. A numerical study on severe downslope windstorms occurred on 5 April 2005 at Gangneung and Yangyang, Korea // *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, Vol. 46, №. 2, pp. 155–172.
51. Jiang Q., Doyle J. D. Wave breaking induced surface wakes and jets observed during a bora event// *Geophysical Research Letters*, 2005, Vol.32, Issue 17, pp.1–5.
52. Jurcec, V. On mesoscale characteristics of Bora conditions in Yugoslavia. *Pure Appl. Geophys.* 119, 1981, p.640–657.
53. Kislov A., Matveeva T. An extreme value analysis of windspeed over the European and Siberian parts of Arctic region// *Atmospheric and Climate Sciences*, 2016, Vol.6, pp. 205–223.
54. Klemp J.B. and Durran D.R. Numerical modeling of bora winds // *Meteorol. Atmos. Phys.*, 1987, Vol.36, pp.215–227.
55. Lazic L., Tosic I. A real data simulation of the adriatic bora and the impact of mountain height on trajectories// *Meteorol. Atmos. Phys.*, 1998, Vol.66, pp.143–155.
56. Lilly D.K. and Klemp J.B. Comments on «The evolution and stability of finite amplitude mountain waves». Part II: Surface wave drag and severe downslope winds. *J. Atmos. Sci.*, 1980, v. 37, p. p. 2119–2121.
57. Lin Y. L. Mesoscale dynamics. Cambridge University Press, 2007, p.646.
58. Lin Y. L. and Wang T. A. Flow regimes and transient dynamics of two-dimensional stratified flow over an isolated mountain ridge // *J. Atmos. Sci.*, 1996, Vol. 53, №. 1, pp. 139–158.

59. Lindsey D. T. A High Wind Statistical Prediction Model for the Northern Front Range of Colorado //National Weather Association, Electronic Journal of Operational Meteorology, 2011.
60. Long R.R. Some aspects of the flow of stratified fluids: II. Experiments with a two-fluid system // Tellus, 1954, Vol. 6, pp. 97–115.
61. Long R. R. Some aspects of the flow of stratified fluids. III. Continuous density gradients. Tellus, 1955, v.7, No.3.
62. Lyra G. Theorie der stationaren Leewellenstromung in freien Atmosphere // Z. Angew. Math.Und Mech. 1943, V.23, №.1, P. 1–28.
63. Markowski, P., Y. Richardson, Mesoscale Meteorology in Midlatitudes / Royal Meteorological Society, 2010, 327 p.
64. Mohorovicic, A. 1889. Interesting cloud pictures over the Bay of Buccari(with a comment from the editor J. Hann) (Interessante Wolkenbildung ber der Bucht von Buccari).Meteorol. Z. 24, 56–58.
65. Moore, G. W. K. The Novaya Zemlya Bora and its impact on Barents Sea air-sea interaction// Geophys. Res. Lett., 2013, Vol. 40, pp. 3462–3467.
66. Peltier W.R. and Clark T. L. The evolution and stability of finite-amplitude mountain waves. Part II: Surface wave drag and severe downslope winds. J. Atmos. Sci., 1979, v. 36, p. 1498–1529.
67. Queney et al. The airflow over mountains. World Meteorol. Organiz., Technical note, № 43, 1960 (Ed. M.A. Alaka).
68. Rontu L.A. A finite-amplitude mountain in wave model.// Department of Meteorol. University of Helsinki, 1986, Report № 26, p. 41.
69. Saito K., Ikawa M. A Numerical Study of the Local Downslope Wind "Yamaji-kaze" in Japan //Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 1991, Vol. 69, №. 1, pp. 31–56.
70. Scinocca J. F., Peltier W. R. The instability of Long's stationary solution and the evolution toward severe downslope windstorm flow. Part I: Nested grid numerical simulations //J. Atmos. Sci., 1993, Vol. 50, №. 14, pp. 2245–2263.
71. Smith R. B. The influence of mountains on the atmosphere //Advances in geophysics, 1979, Vol. 21, pp. 87–230.
72. Smith R.B. Aerial observations of Yugoslavian bora// J. Atmos. Sci., 1987, Vol.44, Issue 2, pp. 269–297.
73. Smith R.B., Doyle J.D., Jiang Q.F., Smith S.A. Alpine gravity waves: lessons from MAP regarding mountain wave generation and breaking// Q.J.R.Meteorol.Soc., 2007, Vol. 133, pp. 917–36.
74. Smith C. M. and Skillingstad E. D. Investigation of upstream boundary layer influence on mountain wave breaking and lee wave rotors using a large eddy simulation// J. Atmos. Sci., 2009, Vol. 66, pp. 3147–3164.
75. Smith C. M., Skillingstad E. D. Effects of inversion height and surface heat flux on downslope windstorms //Mon. Wea. Rev., 2011, Vol. 139, №. 12, pp. 3750–3764.

76. Scorer R.S. Theory of waves in the lee of mountains. // Quart. J. Roy Meteorol. Soc., 1949, v.75, № 323, p. 41–56.
77. Scorer R.S. and Klieforth H. Theory of mountain waves of large amplitude. Quart.J. Meteorol. Soc., v. 85, № 364, 1959.
78. Vucetic V. Severe bora on the mid-Adriatic //HrvatskiMeteoroloskicasopis, 1993, Vol.28, pp.19–36.
79. Wang T. A., Lin Y. L. Wave ducting in a stratified shear flow over a two-dimensional mountain. Part II: Implications for the development of high-drag states for severe downslope windstorms // J. Atmos. Sci., 1999, Vol. 56, № 3, pp. 437–452.
80. Yoshino, M. M. (ed.) *Local Wind Bora*. University of Tokyo Press, Tokyo, 1976, 289 pp.

**REVIEW OF WORKS DEDICATED TO THE SIMULATION
OF THE PHENOMENA OF THE FLOW OF THE NORTHERN
SURFACE OF THE EARTH AND THE CATASTROPHIC WINDS
OF THE TYPE OF BORY**

**M.K. Bedanokov¹, R.B. Berzegova¹, V.N. Kozhevnikov², Y. A. Ekba³,
O.P. Shevyakova¹**

¹Maykop State Technological University, Maikop,

²Moscow State University named after M.V.Lomonosov, Moscow,

³Institute of Ecology of the Academy of Sciences of Abkhazia, Republic of
Abkhazia, Sukhum

The paper deals with two-dimensional problems of flow of ground surface irregularities of the following types: nonlinear and linearized, multilayered and single-layer, limited and unlimited. Three basic mechanisms of boron formation are discussed, within which boron studies are considered: a) on the basis of analytical nonlinear models, b) on the basis of the application of various numerical models.

Keywords: *atmospheric physics, hydrodynamics, flow, orographic disturbances, orographic waves. leeward slope, Lyra scale, hydraulic surge, wave collapse, boron, Novorossiysk bora, model WRF-ARV.*

Об авторах:

БЕДАНОВ Мурат Капланович – доктор экономических наук, декан инженерно-экономического факультета Майкопского государственного технологического университета, ведущий научный сотрудник Лаборатории геоэкологии, геоинформатики и рационального природопользования Майкопского государственного технологического университета, профессор кафедры высшей математики и системного анализа Майкопского государственного технологического университета.

БЕРЗЕГОВА Роза Батырбиевна – старший преподаватель кафедры высшей математики и системного анализа Майкопского государственного технологического университета, младший научный сотрудник Лаборатории геоэкологии, геоинформатики и рационального природопользования Майкопского государственного технологического университета.

КОЖЕВНИКОВ Валентин Николаевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры физики атмосферы физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова, профессор кафедры физики атмосферы физического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

ЭКБА Январби Алиевич – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой прикладной экологии Абхазского государственного университета, профессор кафедры прикладной экологии Абхазского государственного университета, ведущий специалист Академии Наук Абхазии.

ШЕВЯКОВА Ольга Петровна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории геоэкологии, геоинформатики и рационального природопользования Майкопского государственного технологического университета, доцент кафедры высшей математики и системного анализа Майкопского государственного технологического университета.